

日本の玄能石と玄能石コンクリーション：産出地層の堆積環境

村宮悠介¹・吉田英一²

¹ 深田地質研究所

² 名古屋大学博物館

Glendonite and “glendonite concretion” in Japan: sedimentary environment of glendonite-bearing strata

MURAMIYA Yusuke¹, YOSHIDA Hidekazu²

¹Fukada Geological Institute

²Nagoya University Museum

要旨：玄能石は、初期続成過程で形成する主に方解石（CaCO₃）からなる双角錐状をしたイカイト（CaCO₃・6H₂O）の仮晶で、世界各地の幅広い時代の堆積岩から発見されている。本報告では、日本国内の玄能石を産する地層について、著者らの野外調査とこれまでに公表されている産出記録から、分布地・時代・岩相・堆積環境・玄能石の産状とともに取りまとめた。その結果、多くの玄能石は、比較的深い海に堆積した泥質岩から産することが分かった。これは、玄能石の先駆物であるイカイトが、低温環境下において有機質な泥質堆積物中で形成されやすいことを反映していると考えられる。また、玄能石が球状炭酸塩コンクリーションの中央部に含まれている「玄能石コンクリーション」タイプも、半数以上の玄能石含有地層で見られ、その分布は地理的にも時代的にも広い範囲に及ぶことが初めて示された。このことは、玄能石が形成する初期続成過程において、玄能石を含むコンクリーションの形成が特殊なものではないことを示している。

キーワード：玄能石、玄能石コンクリーション、イカイト、堆積環境、初期続成過程

Abstract: Glendonite known as a bipyramidal shaped calcite (CaCO₃) pseudomorph of ikaite (CaCO₃·6H₂O), forms during early diagenesis in sedimentary rocks distributed in wide geological ages around the world. In this report, glendonites found in Japan are compiled with the locations, ages, lithofacies and sedimentary environment of glendonite-bearing strata, and mode of occurrences of glendonite based on the field observations and published articles. As reviewing results, most of glendonites are found in muddy rocks deposited in relatively deep sea. This probably reflects that ikaite crystal, the precursor of glendonite, tends to be formed in organic-rich muddy sediments under cold environment. Within all glendonites described from various ranges of geological and geometrical conditions in Japan, more than half of the glendonite are occurred in “glendonite concretions”, spherical carbonate concretions commonly situate glendonite in its center. This suggests that glendonites formation must have close relationship with the glendonite concretion formation during early diagenesis.

Keywords: glendonite, glendonite concretion, ikaite, sedimentary environment, early diagenesis

1. はじめに

玄能石は、双角錐状あるいはそれが複数集合して X 字型や金平糖型を呈した、方解石 (CaCO_3) からなるイカイト ($\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) の仮晶である (図 1)。玄能石の先駆鉱物種は長年の間不明で、長らく議論が交わされてきたが (例えば、池上, 1965, 1968; Boggs Jr, 1972; 伊藤, 1977; 渋谷, 1977), この議論は、南極海の海底堆積物から玄能石に形状、性質、化学的特徴が酷似したイカイトの結晶が報告されたこと (Suess et al., 1982) で決着した。堆積物中で形成したイカイトの結晶は、周囲の環境がイカイトの安定条件を外れると、結晶の外形を保ったまま脱水して粒状方解石の集合体へと変化する。その後、粒状方解石の間隙を方解石や石英がセメントすることで玄能石が形成される。つまり、堆積物中に形成したイカイト結晶の内部が、方解石もしくは方解石と石英の集合体に置き換わったものが玄能石である。したがって、地層から玄能石が産出することは、その地層が堆積したときに堆積物中でイカイトの結晶が形成していたことを意味している。

玄能石の先駆物となるイカイト結晶は、堆積物のごく表層付近 (深度 < 10 m) で形成する (Lu et al., 2012; 角和ほか, 2019)。イカイトは常温常圧の環境下では不安定な準安定相 (Marland, 1975) だが、方解石などのイカイトよりも安定な炭酸カルシウム鉱物の沈殿を阻害するリン酸イオンなどの物質が高濃度で存在する場合は、安定に沈殿する (Bischoff et al., 1993)。実際に、イカイト結晶が形成している海成堆積物中では、間隙水中のリン酸イオン濃度が海水の 100 倍以上に達することが複数の地点において確認されている (Zhou et al., 2015)。また、イカイトは低温環境において安定に沈殿することが知られている。天

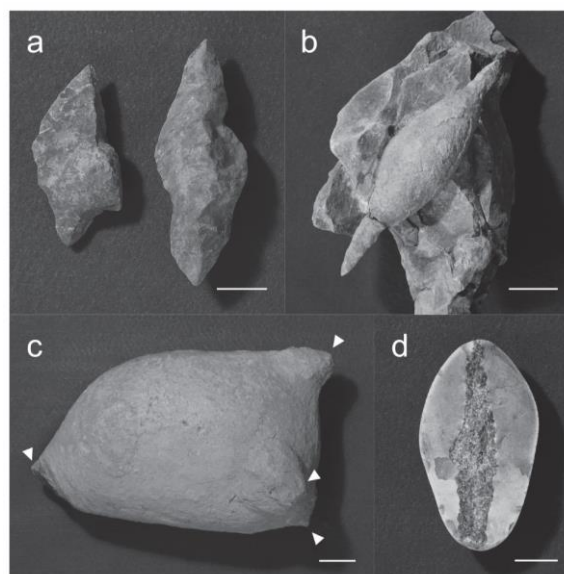


図 1 玄能石と玄能石コンクリーション。スケールは 2 cm。a) 泥岩から直接産した玄能石 (母岩タイプ)。左は別所層産、右は幌内層産。b) 幌内層から産した玄能石コンクリーション。玄能石の両端がコンクリーションから突き出している。c) 白坂層の玄能石コンクリーション (関内幸介氏提供)。金平糖型をした玄能石の端部がコンクリーションから突き出している (白矢印)。d) 望来層から産した玄能石コンクリーション (破断面)。中央を貫く色の濃い部分が玄能石。

然環境下におけるイカイトの存在は、概ね 7°C 以下に限られており、海成堆積物中のイカイトは、低温の海水が存在する極域や深海域からのみ報告されている (Suess et al. 1982; Stein and Smith, 1986; Jansen et al., 1987; Lu et al., 2012; 角和ほか, 2019)。また、陸上の湧水地でも、イカイトが形成するのは気温が低い冬期に限られている (Ito, 1996; 伊藤・安田, 1999)。さらに、イカイトは周囲の温度が上昇すると直ちに方解石へ脱水分解をすることが知られており (例えば, Sanchez-Pastor et al., 2016)、海底堆積物中に形成するイカイト結晶も、採取後に常温環境にさらすと数時間以内に分解してしまう (Suess et al., 1982)。このようなイカイトの温度に対する敏感性から、玄能石は、冷たい水が存在する環境を示す指標として、

古環境復元に広く用いられている (De Lurio and Frakes, 1999; Price, 1999; Spielhagen and Tripathi, 2009; Rogov et al., 2017; Wang et al., 2020).

玄能石は先カンブリア界～第四系まで、世界各地の幅広い年代の堆積岩から産出する。玄能石の存在は、国内でも古くから知られており (例えば、高, 1896; 比企, 1897), これまでに多くの産出報告がある。渋谷 (1977) は初めて国内の玄能石の産出記録を集約し、複数の地層間で産状と鉱物学的特徴にいくつかの共通性があることを見いだした。しかし、当時は玄能石の先駆鉱物種が不明であったため、その共通性を持つ意味と、玄能石あるいはその先駆鉱物の形成環境に関する詳しい考察はなされなかった。その後、玄能石の先駆鉱物種が明らかになって玄能石に関する理解は大きく進んだが、集約された国内の玄能石の産出記録に対して、新たな知見をもとに考察がされることはなかった。本報告では、著者らによる野外調査の結果と日本国内における玄能石の産出記録のレビューから、玄能石の産出地層と産状の特徴についての取りまとめを行った。また、複数の地層間で共通する特徴について、玄能石の先駆鉱物であるイカイトの形成環境の観点から考察した結果について述べる。

2. 日本における玄能石の産状とその特徴

著者らの調査結果およびこれまでに公表された産出記録から、玄能石を産する地層、その分布地・時代・岩相・堆積環境、そして玄能石の産状をとりまとめた (図2, 表1)。著者らの野外調査によって新たに判明したものも含めて、国内では35の地層から玄能石が産出することが分かった。その地理的な分布は、北は北海道、西は愛知県に及ぶ (図2)。渋谷 (1977) の報告時には、日本

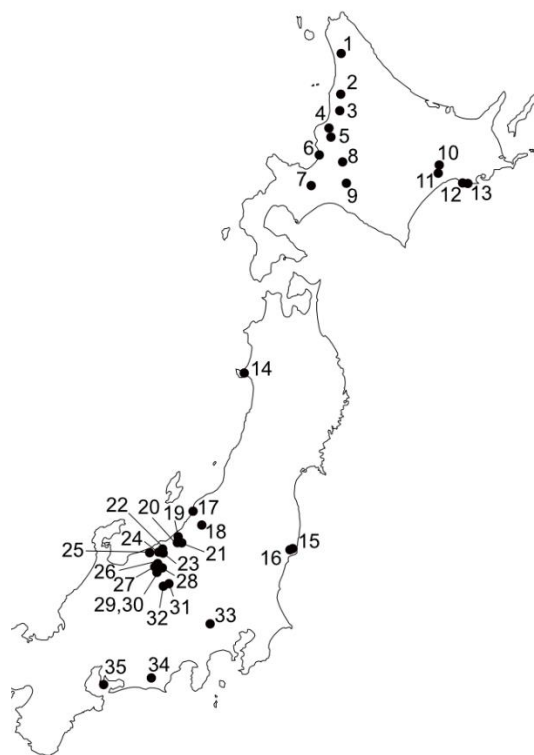


図2 日本国内の玄能石産地。地図中の数字は表1と対応。

における玄能石の産出は糸魚川静岡構造線以東に限られるとされていたが、糸魚川静岡構造線以西に分布する戸綿層 (静岡県西部) と豊浜層 (愛知県南部) から産出することが分かった。一方で、愛知県以西では玄能石の産出は未だに確認されていない。玄能石を産する地層の年代は始新世～更新世に及ぶ。岩相は、塊状の細粒砂岩や泥岩、または砂岩泥岩互層が主体で、後者では玄能石は泥岩部から産出することがほとんどである。汽水成の双連層以外はいずれも海成層で、その多くが水深 200 m 程度、あるいは、それよりも深い海域で堆積した地層だと考えられる。玄能石の産状には、母岩に直接含まれるものと、球状炭酸塩コンクリーションの中央部に含まれるもの (玄能石コンクリーション) の2タイプが存在する (図1)。ここで、前者の産状を「母岩タイプ」、後者の産

表 1 日本国内の玄能石を産する地層とその特徴および玄能石の産状。1) 日本の地質「北海道地方」編集委員会編 (1990), 2) 日本の地質「東北地方」編集委員会編 (1989), 3) 日本の地質「中部地方 I」編集委員会編 (1988), 4) 日本の地質「関東地方」編集委員会編 (1986).

地層名	分布地	時代	岩相	古水深	母岩タイプ	玄能石コンクリーションタイプ	文献
1 勇知層	北海道北部	鮮新世 (嵯峨山, 2003)	層理の発達しない砂質シルト岩。	浅海 (野田・天野, 1985)	●	●	野田・天野, 1985
2 三毛別層砂岩層	北海道北部	後期始新世 (栗田ほか, 1992)	シルト質細粒砂岩。多数の海生軟体生物化石と、貝化石・玄能石を内包するコンクリーションを含む。	外側陸棚 (栗田ほか, 1992) 内部～外部浅海帯 (花方, 2003)	●	●	松野・木野, 1960
3 達布層泥岩層	北海道北部	後期始新世 ¹⁾	暗灰色塊状泥岩。貝化石・甲殻類化石・玄能石を内包するコンクリーションを含む。	上部半深海 (飯島, 1996)	●	●	対馬ほか, 1958
4 増毛層泥岩層	北海道中部	後期中新世 ¹⁾	暗灰色～灰色泥岩。		●	●	佐藤ほか, 1964
5 徳富層	北海道中部	後期中新世 (秦ほか, 1963)	軟質灰色泥岩。玄能石を内包するコンクリーションを含む。	浅海帯～漸深海帯 (Asano, 1953)	●	●	土田, 1953
6 望来層	北海道中部	後期中新世 (樺戸研, 1995)	層状の珪質泥岩。	水深200～300 mの漸深海 (高野ほか, 1996)	●	●	著者らが調査
7 一の沢層簾舞頁岩部層	北海道中部	中新世 (土居・小山内, 1956)	暗灰色泥岩が主体で、凝灰質砂岩薄層が挟在。コンクリーションを含む。		●	●	土居・小山内, 1956
8 幌内層	北海道中部	後期始新世 ¹⁾	塊状暗灰色泥岩。貝化石・甲殻類化石・玄能石を内包するコンクリーションを含む。	下部浅海帯～上部漸深海帯 (Suzuki, 2000)	●	●	著者らが調査
9 紅葉山中間層 黒灰色頁岩層	北海道中部	前期漸新世 (海保, 1984)	黒灰色頁岩。貝化石・玄能石を内包するコンクリーションを含む。	浅海 (飯島, 1996) outer sublittoral ~ littoral (花方, 2003)	●	●	村田, 1923
10 大曲層	北海道東部	後期始新世 ¹⁾	青灰色細砂岩。貝・クモヒトデの化石を含む。	浅海 ¹⁾			馬淵, 1962
11 茶路層	北海道東部	前期漸新世 ¹⁾	暗灰色～黒色泥岩。貝化石・玄能石を内包するコンクリーションを含む。	上部半深海帯 (飯島, 1996)	●	●	馬淵, 1962
12 舌辛層中部層	北海道東部	後期始新世 ¹⁾	淡黄灰色砂質泥岩～泥質細砂岩。海生動物化石を多産する。	浅海 (飯島, 1996)	●	●	伊藤, 1977
13 双運層	北海道東部	後期始新世～前期漸新世 ¹⁾ (※浦幌層群の年代)	淡灰色～暗灰色泥岩。	汽水 (伊藤, 1977)	●	●	伊藤, 1977

表 1 続き

地層名	分布地	時代	岩相	古水深	母岩タイプ	コンクリーションタイプ	文献
14 瀬本層	秋田県北部	中期更新世中期 ²⁾	砂質泥岩・泥質砂岩・砂岩。玄能石を内包するコンクリーションを含む。	水深数百 m 程度の深海 (大江・渡辺, 2018)		●	藤岡, 1950
15 白坂層	福島県南部	前期漸新世 ²⁾	塊状青灰色泥岩。	上部外浜～内側陸棚(上田ほか, 2003)	●	●	関内, 1994
16 浅貝層	福島県南部	前期漸新世(安藤ほか, 2011)	灰色～緑灰色砂岩で、玄能石は泥質部に含まれる。	外側陸棚～陸棚斜面上部(安藤ほか, 2011)	●	●	関内, 1994
17 寺泊層	新潟県中部	中期～後期中新世 ³⁾	帯緑灰色泥岩と灰白色砂岩との互層で、玄能石は泥岩部に含まれる。	半深海～深海 ³⁾	●		渋谷, 1977
18 荒谷層	新潟県中部	後期中新世 ³⁾	暗灰色～黒灰色塊状泥岩。コンクリーションを含む。		●	●	森清ほか, 2018
19 小萱層	新潟県南部	中期～後期中新世 ³⁾	葉理のやや発達した帯青灰色の泥岩が主体で、凝灰岩薄層を多く挟む。	中部漸深海帯下部の水深 1000～2000 m(上田ほか, 1987)			渋谷, 1977
20 田麦川層	新潟県中部	鮮新世 ³⁾	砂岩泥岩互層からなり、厚層砂岩とともに、ときに砂質シルト岩や泥岩を挟む。	水深 150～250 m(立石, 1987)			立石, 1987
21 菖蒲層	新潟県中部	鮮新世 ³⁾	暗灰色塊状の泥岩からなる。	水深 150～250 m(立石, 1987)			立石, 1987
22 能生谷層横畑部層	新潟県南部	後期中新世 ³⁾	泥質フリッシュ・暗灰色塊状泥岩・等量フリッシュが主要で、砂岩・砂質フリッシュを挟む。玄能石は泥岩・頁岩部に含まれる。	水深 1000～2000 m 前後(立石ほか, 1997)			速藤・立石, 1990
23 難波山層I砂岩泥岩互層	新潟県南部	中期～後期中新世 ³⁾	等量砂岩泥岩互層で、玄能石は泥岩部に含まれる。	水深 2000 m 前後(立石ほか, 1997)	●		赤羽・加藤, 1989
24 火打山層	新潟県南部	中期～後期中新世 ³⁾	葉理の著しい硬質黒色頁岩。				西田ほか, 1974
25 根知層	新潟県南部	後期中新世～前期鮮新世初期(長森ほか, 2010)	生物擾乱が著しい灰色塊状砂質泥岩および泥質砂岩。コンクリーションを含む。	下部浅海帯～上部漸深海帯(長森ほか, 2010)			長森ほか, 2010
26 田ノ頭層	長野県北部	前期鮮新世(長森ほか, 2003)	ほぼ塊状の泥岩ないし砂質泥岩を主体とし、数 cm 間隔の成層構造を示す砂質泥岩-泥岩優勢の砂岩泥岩互層を挟む。		●		長森ほか, 2003

表 1 続き

地層名	分布地	時代	岩相	古水深	母岩タイプ	コンクリーションタイプ	文献
27 鬼無里累層季平礫岩泥岩部層	長野県北部	後期中新世～鮮新世 (姫川団研, 1958)	主に塊状の暗灰色～黒色泥岩からなり、まれに砂岩層・礫岩層・凝灰岩層を挟む。				姫川団研, 1958
28 浅川泥岩層	長野県北部	中期中新世(長森ほか, 2003)	淡灰色～暗灰色の細粒～中粒の泥岩が主体で、上部には砂岩層が多く挟みこむ。		●		八木・八木, 1958
29 町砂質泥岩層	長野県北部	後期中新世～鮮新世 (長森ほか, 2003)	暗黒色～暗灰色砂質泥岩が主体で、時に砂岩泥岩互層となる。玄能石は泥岩部から産出。				富澤, 1953
30 論地泥岩層	長野県北部	中新世(渋谷, 1977)	灰色～暗灰色の細粒～中粒砂岩。				八木・八木, 1958
32 別所層	長野県中部	中期中新世 ³⁾	黒灰色泥岩。	浅海帯～上部漸深海帯 (Suzuki, 1982)	●		渋谷, 1977
31 伊勢山層	長野県中部	中期中新世 ³⁾	葉理の発達した黒色頁岩。				渋谷, 1977
33 小庄互層	東京都西部	中期中新世 ⁴⁾	黒灰色塊状泥岩と石灰質細粒砂岩との互層。玄能石は両者から産出。	水深200 m以深の泥底(Kanno, 1967)	●	●	渋谷, 1977
34 戸綿層	静岡県西部	前期中新世 ³⁾	暗灰色塊状シルト岩 ³⁾ 。		●	●	氏原, 私信
35 豊浜層	愛知県南部	前期中新世(伊藤ほか, 1999)	暗灰色泥岩と灰色凝灰岩の互層。玄能石は泥岩から産出。甲殻類・玄能石を内包するコンクリーションを含む。	漸深海(Shikama and Kase, 1976; Kato and Oji, 2013)	●	●	村宮ほか, 2020

状を「玄能石コンクリーションタイプ」とよぶ。今回行った野外調査と文献調査では、35 地層のうち 19 地層から玄能石コンクリーションタイプの産出が確認された。

3. 玄能石の産状とイカイトの形成環境の関係

日本国内における玄能石の産出報告は、細粒砂岩よりも粒子径の小さい堆積岩に限られる。中でも、灰色～黒色の泥質堆積岩からの産出が多い。国外に目を向けても、玄能石の産出報告は灰色～黒色の泥質堆積岩からほとんどで（例えば、Selleck et al., 2007; Spielhagen and Tripathi, 2009; Teichert and Luppold, 2013; Grasby et al., 2017）、これまで礫岩などの粗粒な堆積岩からの報告はない。また、現在の海成堆積物から発見されるイカイト結晶も、有機質に富む暗色の泥質堆積物中に含まれている（例えば、Suess et al., 1982; Stein and Smith, 1986; Jansen et al., 1987; Lu et al., 2012; 角和ほか, 2019）。イカイトの形成には、材料となる重炭酸イオンと、他の炭酸カルシウム鉱物の沈殿を妨げるリン酸イオンが高濃度で存在することが必要である（Bischoff et al., 1993）。現生の海成堆積物から発見されるイカイトの多くは、有機物由来の炭酸塩に特徴的な炭素同位体比を持ち（Suess et al., 1982; Jansen et al., 1987; Greinert and Derkachev, 2004）、リン酸イオン濃度の高い堆積物中で形成されている（Zhou et al., 2015）。有機質に富む堆積物中では、堆積物中の有機物粒子や埋没した生物遺骸などが分解されることでこれらの物質が生成され、イカイトの沈殿に適した環境になりやすいと考えられる。一方で、粗粒砂や礫を主体とする堆積物では、有機物の含有量が相対的に少なく、イカイトの沈殿に適した環境になりにくい可能性がある。このことから、玄能石の多くが暗色の泥

質堆積岩から産出するのは、玄能石の先駆鉱物のイカイトが、このような堆積岩のもととなる有機質に富む暗色の泥質堆積物中で形成されやすいことを反映していると考えられる。

玄能石を産出する地層の多くが比較的深い海で堆積したものであることは、このような深い海では海底水温が低いため、イカイト結晶が形成しやすいことによると考えられる。一方で、勇知層、大曲層、紅葉山層などの浅海成層や、汽水成の双運層に玄能石が含まれることは、これらの地層が堆積した当時、浅海域や汽水域においても低温水塊が常に存在していたことを示している。したがって、これらの地層が堆積した当時、堆積場周辺の気候は寒冷だったことが示唆される。

玄能石を産する地層の堆積年代は始新世～更新世までと幅広いが、現在のところ、地理的な分布は愛知県以東にしか知られていない。この理由として、愛知県以西の地域では、緯度が低いため愛知県以東の地域よりも温暖で、イカイトが形成する低温環境が成立しにくかったことが考えられる。また、愛知県以西の地域では、付加体を除けば愛知県以東の地域よりも深海成の泥質堆積岩の分布域が少なく（参考：20 万分の 1 シームレス地質図）、このことも原因になっている可能性がある。

今回の調査で、玄能石を産する 35 の地層のうち、少なくとも 19 の地層から玄能石コンクリーションが産出することが分かった。国内で玄能石が産する 8 都道府県のうち、玄能石コンクリーションは長野県を除いた 7 都道府県から産出している。また、国内では始新世～更新世の地層から玄能石が産出するが、玄能石コンクリーションはいずれの時代からも産出している。したがって、玄能石コンクリーションタイプの産状は、玄能石の産状の中では特殊なものではなく、むしろ一般的なもの

のだといえる。このことは、玄能石コンクリーションの形成プロセスを理解することは、玄能石およびイカイトの形成プロセスを考えるうえで重要であることを示唆している。

4. まとめ

本研究では、これまでに公表されている研究と著者らによる野外調査から、国内における玄能石の産出地層を、地層の分布地・時代・岩相・堆積環境・玄能石の産状とともにまとめた。これにより、国内では玄能石は始新世～更新世までの幅広い時代から産するが、地理的な分布は愛知県以東に限られていることが明らかになった。また、玄能石の多くは、比較的深い海で堆積した泥質堆積岩という限られた堆積環境と岩相の地層から産出している。これは、このような地層が堆積する環境では、イカイトの形成に必要な低水温と、重炭酸イオンおよびリン酸イオンの高い濃度が成立しやすいことが原因だと考えられる。「玄能石コンクリーション」タイプの玄能石は、玄能石を産する35の地層のうち、少なくとも19の地層から産出することが初めて分かった。このことは、玄能石の産状において、玄能石コンクリーションタイプは特殊な事例ではないことを意味している。

謝辞

名古屋大学環境学研究科の氏原 温准教授、福島県教育委員会の小林寿宣氏、いわき地域学会幹事の関内幸介氏には有益な情報と標本をご提供いただきました。札幌市の福田堅之氏、辻 貴敏氏、吉井正史氏には有益な情報をご提供頂きました。御礼を申し上げます。

文献

- 赤羽貞幸・加藤碩一 (1989) : 高田西部地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 90p.
- 安藤寿男・柳沢幸夫・小松原純子 (2011) : 常磐地域の白亜系から新第三系と前弧盆堆積作用. 地質学雑誌, **117**, 49–67.
- Asano, K. (1953): Miocene foraminifera from the Shintotsugawa area, Kabato-Gun, Hokkaido. *Transactions and Proceedings of the Palaeontological Society of Japan, New Series*, **10**, 45–54.
- Bischoff, J. L., Fitzpatrick, J. A. and Rosenbauer, R. J. (1993): The solubility and stabilization of ikaite ($\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) from 0° to 25°C: Environmental and paleoclimatic implications for thinolite tufa. *Journal of Geology*, **101**, 21–33.
- Boggs Jr, S. (1972): Petrography and Geochemistry of rhombic, calcite pseudomorphs from Mid-Tertiary mudstones of the Pacific Northwest, U.S.A. *Sedimentology*, **19**, 219–235.
- De Lurio, J. L. and Frakes, L. A. (1999): Glendonites as a paleoenvironmental tool: Implications for early Cretaceous high latitude climates in Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **63**, 1039–1048.
- 土居繁雄・小山内 熙 (1956) : 石山地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 北海道地下資源調査所, 54p.
- 遠藤正孝・立石雅昭 (1990) : 北部フォッサマグナ, 中新世の難波山海底扇状地の復元. 地質学雑誌, **96**, 193–209.
- 藤岡一男 (1950) : 男鹿半島第三系の層序と構造. 石油技術協会誌, **15**, 116–126.
- Grasby, S. E., McCune, G. E., Beauchamp, B. and

- Galloway, J. M. (2017): Lower Cretaceous cold snaps led to widespread glendonite occurrences in the Sverdrup Basin, Canadian High Arctic. *Bulletin of the Geological Society of America*, **129**, 771–787.
- Greinert, J. and Derkachev, A. (2004): Glendonites and methane-derived Mg-calcites in the Sea of Okhotsk, Eastern Siberia: Implications of a venting-related ikaite/glendonite formation. *Marine Geology*, **204**, 129–144.
- 花方 聡 (2003)：有孔虫化石からみた始新統幌内層および漸新統紅葉山層の地史（再検討）。石油技術協会誌, **68**, 259–270.
- 秦 光男・佐藤博之・垣見俊弘・山口昇一・小林勇 (1963)：西徳富地域の地質。地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 51p.
- 比企 忠 (1897)：信濃國ゲンノー石。地質学雑誌, **4**, 139–141.
- 姫川団体研究グループ (1958)：糸魚川–静岡線北部にそう地帯の第三紀層。地質学雑誌, **64**, 431–444.
- 飯島 東 (1996)：北海道の古第三系堆積盆の変遷。地学雑誌, **105**, 178–197.
- 池上繁雄 (1965)：玄能石について。北海道学芸大学紀要。第二部。B, 生物学, 地学, 農学編, **16**, 69–78.
- 池上繁雄 (1968)：玄能石の原鉱物に就いて。北海道教育大学紀要。第二部。B, 生物学, 地学, 農学編, **19**, 43–53.
- 伊藤知佳・入月俊明・岩井雅夫 (1999)：第一瀬戸内区中新統（師崎, 岩村, 富草層群）の珪藻示準化石と地質年代。地質学雑誌, **105**, 152–155.
- 伊藤俊彦 (1977)：北海道・釧路昆布森地域より産する玄能石について。北海道教育大学紀要。第二部。B, 生物学, 地学, 農学編, **28**, 29–39.
- Ito, T. (1996): Ikaite from cold spring water at Shiowakka, Hokkaido, Japan. *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, **91**, 209–219.
- 伊藤俊彦・安田史樹 (1999)：その場観察「低温鉱物イカイトからカルサイトの生成」。環境教育研究, **2**, 93–96.
- Jansen, J. H. F., Woensdregt, G. F., Kooistra, M. J. and Van Der Gaast, S. J. (1987): Ikaite pseudomorphs in the Zaire deep-sea fan: an intermediate between calcite and porous calcite. *Geology*, **15**, 245–248.
- 樺戸団体研究グループ (1995)：北海道樺戸山地南部, 当別町青山地域の第三系層序。地球科学, **49**, 363–378.
- 海保邦夫 (1984)：北海道中央部夕張地域の第三系の層序。地質学雑誌, **90**, 815–829.
- Kanno, S. (1967): Molluscan fauna from the Miocene formations in the Itsukaichi Basin, Tokyo prefecture. *Prof. Hidekata Shibata Memorial Volume*, 396–406.
- Kato, M. and Oji, T. (2013): A new species of Doraster (Echinodermata: Asteroidea) from the lower Miocene of central Japan: implications for its enigmatic paleobiogeography. *Paleontological Research*, **17**, 330–334.
- 角和善隆・Zhang Naizhong・松本 良・戸丸仁・石田直人・茂手木竜也 (2019)：日本海東縁における堆積物コアからのイカイトの発見とその意義。地質学雑誌, **125**, 853–865.
- 高 壯吉 (1896)：信濃小縣郡鑛物談。地質学雑誌, **3**, 321–323.
- 栗田裕司・一ノ関鉄郎・平松 力 (1992)：北海道羽幌地域の三毛別層と羽幌層の地質年代。

- 地質学雑誌, **98**, 259–266.
- Lu, Z., Rickaby, R. E. M., Kennedy, H., Kennedy, P., Pancost, R. D., Shaw, S., Lennie, A., Wellner, J. and Anderson, J. B. (2012): An ikaite record of late Holocene climate at the Antarctic Peninsula. *Earth and Planetary Science Letters*, **325–326**, 108–115.
- 馬淵精一 (1962): 釧路炭田古第三系に関する堆積並びに造構造史的考察. 東北大學理學部地質學古生物學教室研究邦文報告, **56**, 1–42.
- Marland, G. (1975): The stability of $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (ikaite). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **39**, 83–91.
- 松野久也・木野義人 (1960): 築別炭砒地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 北海道開発庁, 43p.
- 森清寿郎・森田 亮・古橋奨汰 (2018): 新潟県栃尾地域の荒谷層泥岩に産する, 玄能石を核にもつ石灰質団塊. 地球科学, **72**, 195–211.
- 村宮悠介・氏原 温・大路樹生・吉田英一 (2020): 中新統師崎層群の球状炭酸塩コンクリーションと深海性動物群化石. 地質学雑誌, **126**, 355–363.
- 村田 折 (1923): 栗山地方の地質 (二). 地質学雑誌, **30**, 327–341.
- 長森英明・古川竜太・早津賢二 (2003): 戸隠地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 109p.
- 長森英明・竹内 誠・古川竜太・中澤 努・中野俊 (2010): 小滝地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 130p.
- 日本の地質「中部地方 I」編集委員会編 (1988): 日本の地質 4「中部地方 I」. 共立出版, 332p.
- 日本の地質「北海道地方」編集委員会編 (1990): 日本の地質 1「北海道地方」. 共立出版, 337p.
- 日本の地質「関東地方」編集委員会編 (1986): 日本の地質 3「関東地方」. 共立出版, 335p.
- 日本の地質「東北地方」編集委員会編 (1989): 日本の地質 2「東北地方」. 共立出版, 338p.
- 西田彰一・津田禾粒・市村隆三 (1974): フォッサマグナ最北部の新第三系 (その 1) —いわゆる難波山層に関する研究—. 地質調査所報告, **250**, 155–168.
- 野田浩司・天野和孝 (1985): 北海道天塩町周辺の地質及び古生物概報その 6. 鮮新統“勇知”層産玄能石とその共産化石. 北方科学調査報告: 北方圏の自然と文化の研究, **6**, 1–23.
- 大江文雄・渡辺 晟 (2018): 秋田県男鹿半島の中部更新統脇本層から発見されたスケトウダラ *Theragra chalcogramma* の耳石. 秋田県立博物館研究報告, **43**, 13–20.
- Price, G. D. (1999): The evidence and implications of polar ice during the Mesozoic. *Earth-Science Reviews*, **48**, 183–210.
- Rogov, M. A. and Zakharov, V. A. (2010): Jurassic and Lower Cretaceous glendonite occurrences and their implication for Arctic paleoclimate reconstructions and stratigraphy. *Earth Science Frontiers*, **17**, 345–347.
- 嵯峨山 積 (2003): 北海道北部地域の遠別層・声間層と勇知層の地層境界の地質年代—ルベシュベ川と上ヌカナン川ルート—. 地質学雑誌, **109**, 310–323.
- 佐藤博之・秦 光男・小林 勇・山口昇一・石田正夫 (1964): 国領地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 55p.
- Sánchez-Pastor, N., Oehlerich, M., Astilleros, J. M.,

- Kaliwoda, M., Mayr, C. C., Fernández-Díaz, L. and Schmahl, W. W. (2016): Crystallization of ikaite and its pseudomorphic transformation into calcite: Raman spectroscopy evidence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **175**, 271–281.
- 関内幸介 (1994) : いわき市内郷綴町産玄能石について. 平地学同好会会報, **20**, 31–32.
- Selleck, B. W., Carr, P. F. and Jones, B. G. (2007): A review and synthesis of glendonites (pseudomorphs after ikaite) with new data: Assessing applicability as recorders of ancient coldwater conditions. *Journal of Sedimentary Research*, **77**, 980–991.
- 渋谷正雄 (1977) : 玄能石の産状・形態・組織に関する研究. 地質学雑誌, **83**, 19–26.
- Shikama, T. and Kase, T. (1976): Molluscan fauna of the Miocene Morozaki Group in the southern part of Chita Peninsula, Aichi Prefecture, Japan. *Science reports of the Yokohama National University. Section II, Biological and geological sciences*, **23**, 1–25.
- Spielhagen, R. F. and Tripathi, A. (2009): Evidence from Svalbard for near-freezing temperatures and climate oscillations in the Arctic during the Paleocene and Eocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **278**, 48–56.
- Stein, C. L. and Smith, A. J. (1986): Authigenic carbonate nodules in the Nankai trough, Site 583. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, **87**, 659–668.
- Suess, E., Balzer, W., Hesse, K. F., Müller, P. J., Ungerer, C. A. and Wefer, G. (1982): Calcium carbonate hexahydrate from organic-rich sediments of the Antarctic shelf: Precursors of glendonites. *Science*, **216**, 1128–1131.
- Suzuki, A. (2000): An Eocene cold-water molluscan assemblage from the Poronai Formation in the Mikasa area, central Hokkaido, northern Japan. *Earth Science*, **54**, 363–368.
- Suzuki, K. (1982): Sedimentological analysis of the Neogene basins in the central part of the northern Fossa Magna Region, central Japan. *Memoirs of the Faculty of Science, Kyoto University. Series of geology and mineralogy*, **48**, 1–42.
- 高野 修・保柳康一・能登正明・太田勝一・八幡正弘・樺戸団研堆積相グループ (1996) : 北海道樺戸山地南部における新第三系の堆積シーケンスとその形成過程. 地球科学, **50**, 9–28.
- 立石雅昭 (1987) : 砂岩貯留岩の堆積相について—新潟油田第三系タービダイト貯留岩の例—. 石油技術協会誌, **52**, 38–47.
- 立石雅昭・高野 修・高島 司・黒川勝己 (1997) : 北部フォッサマグナ新生界の粗粒堆積物の堆積システムと後背地. 石油技術協会誌, **62**, 35–44.
- Teichert, B. M. A. and Luppold, F. W. (2013): Glendonites from an Early Jurassic methane seep — Climate or methane indicators? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **390**, 81–93.
- 富澤恒雄 (1953) : 長野県北部裾花川流域の層序と地質構造. 地質学雑誌, **59**, 552–560.
- 土田定次郎 (1953) : 最近の有孔虫調査. 石油技術協会誌, **18**, 192–196.
- 対馬坤六・田中啓策・松野久也・山口昇一 (1958) : 達布地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 66p.
- 上田哲郎・仙田幸造・作本達也・長森英明・小林巖雄 (1995) : 新潟県東頸城地域の中新統小萱層から産出したシロウリガイ類化石. 地球科学, **49**, 341–345.

上田庸平・安藤寿男・篠崎将俊 (2003) : 茨城県北部の古第三系下部漸新統白水層群石城層から浅貝層にかけての堆積相と古地理的意義. 茨城県自然博物館研究報告, **6**, 1-17.

Wang, Z., Chen, C., Wang, J., Suess, E., Chen, X., Ma, X., Wang, G. and Xiao, S. (2020): Wide but not ubiquitous distribution of glendonite in the Doushantuo Formation, South China: Implications for Ediacaran climate. *Precambrian Research*, **338**, 105586, doi: 10.1016/j.precamres.2019.105586.

八木貞助・八木健三 (1958) : 上水内郡地質誌. 長野県上水内教育会, 480p.

Zhou, X., Lu, Z., Rickaby, R. E. M., Domack, E. W., Wellner, J. S. and Kennedy, H. A. (2015): Ikaite abundance controlled by porewater phosphorus level: Potential links to dust and productivity. *Journal of Geology*, **123**, 269-281.